



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA SOUČÁSTI PLOŠNÝM TVÁŘENÍM

PRODUCTION OF COMPONENTS METAL SHEET FORMING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Chvála

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michaela Císařová, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Martin Chvála**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Michaela Císařová, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba součástí plošným tvářením

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o literární studii výroby součástí technologiemi plošného tváření – hlubokým tažením, střiháním a ohýbáním. Polotovarem je tlustý plech. Porovnání aspektů zpracování tenkého versus tlustého plechu.

Cíle bakalářské práce:

Vypracování aktuální literární studie hlubokého tažení, střihání a ohýbání za použití plechu větší tloušťky.

Zhodnocení současných technologií výroby součástí podobných tvarů.

Návrh materiálů a výrobních postupů vhodných ke zpracování technologiemi plošného tváření.

Seznam doporučené literatury:

TSCHATTSCH, Heinz. Metal forming practise: processes - machines - tools. New York: Springer-Verlag, 2006. ISBN 35-403-3216-2.

BOLJANOVIC, Vukota. Sheet metal forming processes and die design. New York: Industrial Press, 2004. ISBN 08-311-3182-9.

TIŠNOVSKÝ, Miroslav a Luděk MÁDLE. Hluboké tažení plechu na lisech. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1990. Knižnice technických aktualit. ISBN 80-030-0221-4.

LIDMILA, Zdeněk. Teorie a technologie tváření. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-72-1-579-6.

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Milan HORÁČEK. Technologie II. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. ISBN 80-214-2032-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

CHVÁLA Martin: Výroba součástí plošným tvářením.

Cílem práce je vypracování rešeršní studie pro operace plošného tváření stříháním, ohýbáním a hlubokým tažením za použití silných plechů. V práci jsou zpracovány postupy pro vytvoření technologického postupu k těmto operacím a vyzdvihnuty rozdílnosti mezi použitím tenkých a silných plechů jako polotovaru.

Klíčová slova: plošné tváření, stříhání, ohýbání, hluboké tažení, silný plech

ABSTRACT

CHVÁLA Martin: Production of components metal sheet forming

. The aim of the thesis is to develop research studies for operations of sheet metal forming by cutting, bending and deep drawing using thick metal sheets. The work deals with procedures for creating a technological process for these operations and raised differences between the use of thin and thick sheets as a semi-finished product.

Keywords: sheet metal forming, cutting, bending, deep drawing, thick metal sheet

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHVÁLA, Martin. *Výroba součástí plošným tvářením*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129526>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Michaela Císařová.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 21.5.2021

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji paní Ing. Michaele Císařové, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

Dále chci poděkovat rodičům za jejich trpělivost při mém studiu, panu Ing. Kamilovi Podanému, Ph.D. za informace ke zpracování BP.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 STŘÍHÁNÍ	10
1.1 Velikost střížné mezery	11
1.2 Výpočet střížné síly a střížné práce	13
1.3 Určení nástřihového plánu	14
2 OHÝBÁNÍ	16
2.1 Ohybová vůle a poloměr ohybu	17
2.2 Neutrální osa a rozměr polotovaru	18
2.3 Odpružení	19
2.4 Výpočet ohybové síly a práce	20
2.5 Porovnání ohýbání oproti jiným technologiím	21
3 HLUBOKÉ TAŽENÍ	22
3.1 Velikost polotovaru	23
3.4 Použití přidržovače	25
3.6 Výpočet tažné síly a práce	26
3.7 Maziva pro tažení	27
3.8 Porovnání hlubokého tažení s dalšími technologiemi	27
4 ZÁVĚRY	28

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam obrázků

Seznam tabulek

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5]

Technologie plošného tváření je nejrozšířenější formou zpracovávání plechů. Lze je nalézt v malých kutilských dílnách s kusovou výrobou i v halách velkých podniků kde se vyrábí velké série. Úspěch jim zaručila hospodárnost jak energetická, tak materiálová, např. oproti technologiím třískového obrábění.

Dělit technologie tváření lze na plošné a objemové. Hlavním rozdílem je působení deformací v materiálu, kdy u plošného tváření převážně nedochází ke změně průřezu materiálu, většinou se provádí za studena a dochází k jeho deformačnímu zpevnění. Mezi technologie plošného tváření patří: stříhání, ohýbání, tažení a tlačení. Do objemového tváření spadá protlačování a kování zápusťkové, nebo volné.

Druhé dělení je podle teplot za kterých se tváření odehrává. Milníkem mezi nimi je teplota dosahující 0,4násobku tavicí teploty materiálu, kdy nastává snížení pevnosti materiálu a následná možné materiál zpracovávat s použitím menších tvářecích sil.

Tato bakalářská práce se bude zabývat technologiemi plošného tváření stříháním, ohýbáním a hlubokým tažením za použití plechů větší tloušťky (nad 3 mm) a rozdílnostmi oproti zpracovávání plechů tenkých.



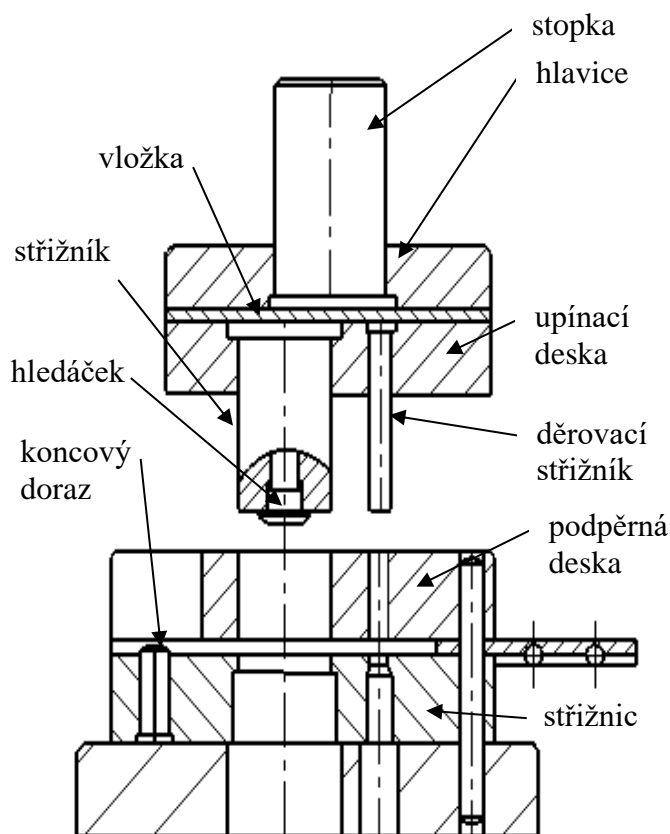
Obr. 1 Příklady výrobků plošného tváření [6], [7], [8], [9]

1 STŘÍHÁNÍ [4], [5], [10], [11], [12], [13]

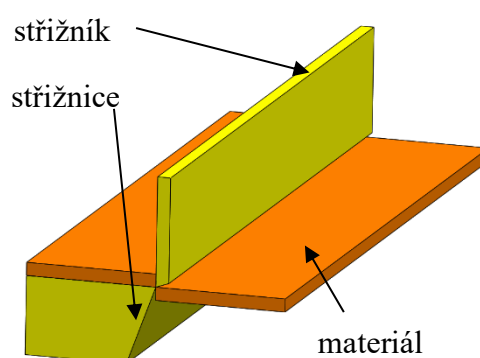
Jedná se o nejčastější způsob dělení trubek, konstrukčních profilů, nebo plechů různých tloušťek konstrukčních ocelí, kdy se z pásu kovu získává konečný výrobek (např. podložky pod matice), polotovar pro následující zpracovávání (ohýbání, tažení, atd.), nebo může být dokončovací operací např. při odstřihávání příruby po hlubokém tažení. Tenké plechy a měkké oceli do pevnosti 400 MPa se stříhají za studena, silné plechy a materiály s pevností nad 400 MPa se stříhají za tepla po ohřevu na teplotu kolem 700 °C.

Principem stříhání je oddělení materiálu za pomoci síly působící na dva protilehlé břity nožů – střížníku a střížnice, které způsobí ve střížné rovině mezi nimi smykové napětí a zapříčiní tím porušení a následné oddělení materiálu o požadovaném tvaru – výstřižku. Hlavní rozdělení stříhání je na jednooperační a víceoperační, kde u víceoperačního následuje za sebou několik jdoucích stříhů zhotovující finální výstřižek (např. podložku, obr. 2). Použít se mohou:

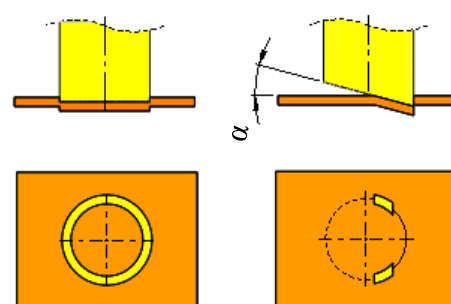
- rovnoběžné nože - např. tabulové strojní nůžky (obr. 3). Jedná se o nejrozšířenější typ střížných nožů. Hodí se na výstřižky o menších rozměrech z důvodu velké střížné plochy a rázů.
- skloněné nože pod úhlem α - např. pákové nůžky. Výhodou oproti stříhání rovnoběžnými noži je snížení potřebné střížné síly. Stříh je postupný a rázy menší. Nevýhodou se stává deformace výstřižku, u kterého dochází k postupnému ohýbání vlivem postupu šikmého ostří. Používá se hlavně u stříhání trubek, různých tyčí a tenkostěnných profilů různých průřezů. Rozdíl mezi stříháním rovnoběžnými a skloněnými noži je vidět na obr. 4, kde je znázorněna okamžitá střížná plocha nástroje.



Obr. 2 Střížný nástroj pro víceoperační stříhání [14]

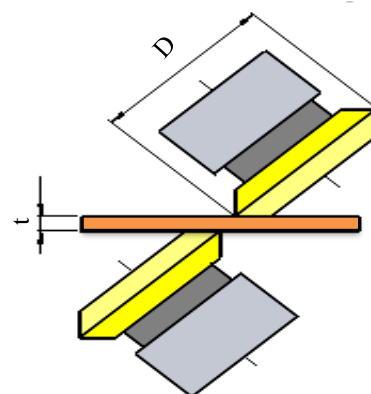


Obr. 3 Rovnoběžné nože [2]



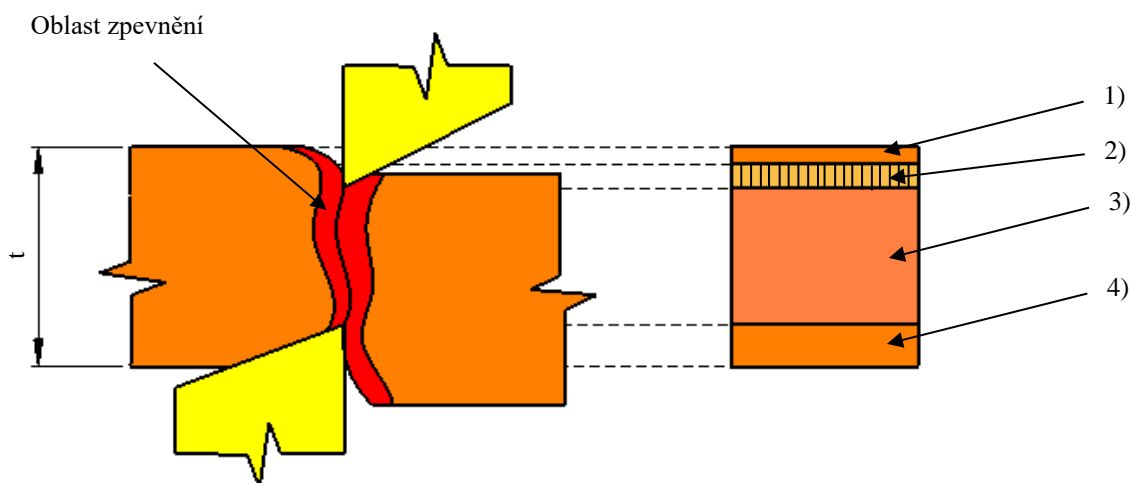
Obr. 4 Okamžitá střížná plocha [13]

- kotoučové nože – se používají pro podélné stříhání pásů silných plechů. Nože se odvalují po materiálu a tím nevznikají rázy, ale prodlužuje se čas stříhu (obr. 5). Pomocí speciálního postavení kotoučových nožů a možnosti manipulovat s plechem při stříhu se dají u tenkých plechů stříhat křivkovité plochy. Velikosti kotoučů se volí co nejmenší podle tloušťky stříhaného materiálu. Pro tenké plechy do tloušťky 3 mm je ideální průměr kotouče $D = 25 \div 50$ násobek tloušťky materiálu a je možný stříh s nakloněnými kotouči. Silné plechy s tloušťkou nad 10 mm je velikost kotouče $D = 25 \div 30$ násobek tloušťky materiálu.



Obr. 5 kotoučové nože [5]

Celý proces stříhu má celkem 3 fáze, při kterých vznikají 4 pásma stříhu, jejichž velikosti se liší podle způsobu stříhání, druhu materiálu a konstrukce nástroje. Navíc vlivem plastické deformace od břitů nožů vznikne na hraně stříhu oblast zpevnění do vzdálenosti $20 \div 30\%$ tloušťky materiálu. Tyto pásma jsou vyobrazena na obr. 6. Běžným stříháním se dosahuje přesnosti zhruba IT 12 až IT 14, následně u přesných stříhadel s vodícími sloupky lze dosáhnout přesnosti IT9 až IT 11. Drsnost střížné plochy dosahuje $3,2$ až $6,3\mu\text{m}$. Pravidlem bývá, že nástroj musí být vyroben o 3 řády přesněji, než je požadovaná přesnost výstřižku.



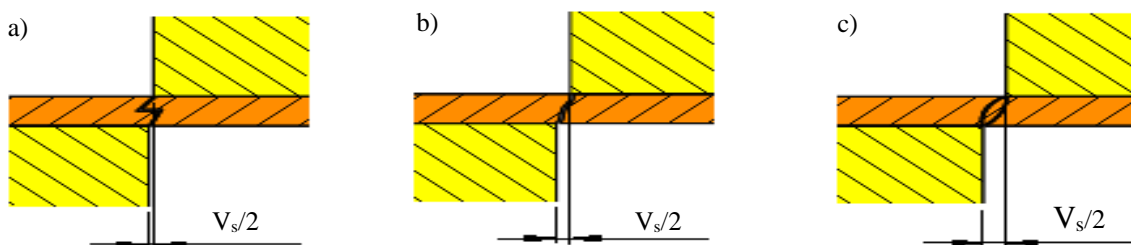
Obr. 6 plocha stříhu [13]

- 1) pásmo zaoblení – první fáze, která odpovídá $5 \div 8\%$ tloušťky stříhaného materiálu a kde se nachází oblast pružné deformace materiálu, kdy střížník stlačuje stříhaný materiál, ale ještě nedochází k jeho proniknutí do materiálu.
- 2) pásmo vlastního stříhu – druhá fáze, která odpovídá $10 \div 25\%$ tloušťky materiálu. Zde se nachází oblast plastické deformace, kdy střížník začne vnikat do materiálu.
- 3) pásmo utržení – třetí fáze s nejširší oblastí na střížné ploše. Zde dochází k tvorbě trhlin na hranici výstřižku a utržení materiálu.
- 4) pásmo otlačení – vzniká od hrany střížnice v průběhu procesu stříhání.

1.1 Velikost střížné mezery [5],[13], [17], [18]

Velikost střížné mezery je jeden z nejdůležitějších parametrů při stříhání. Ovlivňuje jak rozměrovou přesnost, kvalitu střížného povrchu (obr. 7), tak i potřebnou velikost střížné síly. Příliš malá mezera (obr. 7a) způsobí, že okraje ztratí ohybovou složku v podílu plastické deformace a tím se zvýší potřebná střížná síla. Ideální mezerou (obr. 7b) se dosáhne setkání

trhlin v nejkratší vzdálenosti mezi počátky. Při příliš velké mezeře (obr. 7c) dojde k nežádoucímu efektu - vtahování materiálu do střížného nástroje. Kvalitu střížných hranu můžeme vidět na obr. 8 a k určení správné velikosti střížné mezery a střížné vůle lze dojít několika způsoby:



Obr. 7 Střížná mezera [12]

- podle tabulky počátečních vůlí

Tab. 1 Přehled vůlí v_s v závislosti na tloušťce materiálu [15]

Tloušťka materiálu t [mm]	Počáteční střížná vůle v_s [mm]		Tloušťka materiálu t [mm]	Počáteční vůle v_s [mm]	
	Nejmenší	Největší		Nejmenší	Největší
2	0,14	0,2	6	0,6	0,75
2,5	0,2	0,28	8	0,85	1
3	0,24	0,33	10	1,2	1,5
3,5	0,32	0,42	12	1,4	1,8

- výpočtem pomocí vzorce

- pro plechy do tloušťky materiálu $t \leq 3$ mm

$$v_s = 2 \cdot c \cdot t \cdot 0,32 \cdot \sqrt{\tau_s} \text{ [mm]} \quad (1.1)$$

kde: v_s ... střížná vůle [mm]

c ... koeficient otupení nástroje [-]

t ... tloušťka materiálu [mm]

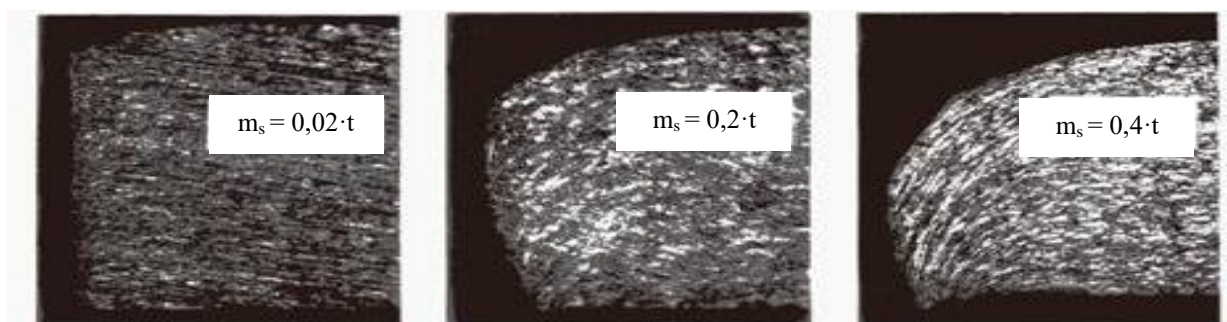
τ_s ... mez pevnosti ve smyku [MPa]

- pro silné plechy s tloušťkou materiálu $t > 3$ mm

$$v_s = 2 \cdot (1,5t - 0,015) \cdot \sqrt{\tau_s} \text{ [mm]} \quad (1.2)$$

- jako procento z tloušťky materiálu

- 2,5 až 7,5 % pro měkké oceli, mosazi a hliník
- 3 až 8,5 % pro středně tvrdé oceli s pevností do 480 MPa
- 3,5 až 10 % pro tvrdé oceli s pevností 600 MPa a vyšší



Obr. 8 Detaily střížné plochy [13]

1.2 Výpočet střížné síly a střížné práce [5], [13]

Střížnou sílu je potřeba spočítat pro určení dostatečně výkonného stroje. V průběhu stříhu při vnikání do materiálu síla působící na nástroj, narůstá a dochází ke zpevnění materiálu od meze kluzu až po mez pevnosti. Střížnou sílu je možno zredukovat o 30 až 40 %, pokud bude stříh proveden skloněnými noži a tím se umožní stříhání silných plechů na méně výkonných strojích.

- výpočet střížné síly

- střížná síla pro rovnoběžné nože

$$F_{srov} = \tau_s \cdot S_{striz} \cdot n_s = 0,8 \cdot R_m \cdot o_s \cdot t \cdot n_s \text{ [N]} \quad (1.3)$$

kde: F_s ... střížná síla [N]

S_{striz} ... plocha stříhu [mm²]

n_s ... součinitel otupění nástroje pro stříh (1,1 až 1,3) [-]

o_s ... obvod střížné plochy [mm]

- střížná síla pro skloněné nože

$$F_{ssklop} = \frac{1}{2} \cdot \frac{t^2}{tg \alpha_{nož}} \cdot \tau_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{t^2}{tg \alpha_{nož}} 0,8 \cdot R_m \text{ [N]} \quad (1.4)$$

kde: R_m ... mez pevnosti [MPa]

$\alpha_{nož}$... úhel sklonu nožů - 1°30' až 6° pro tabulové nůžky

- 7° až 20° pro pákové nůžky

- výpočet střížné práce

- střížná práce pro rovnoběžné nože

$$A_{srov} = \frac{\pi}{4} \cdot F_s \cdot t \cdot \lambda \text{ [kJ]} \quad (1.5)$$

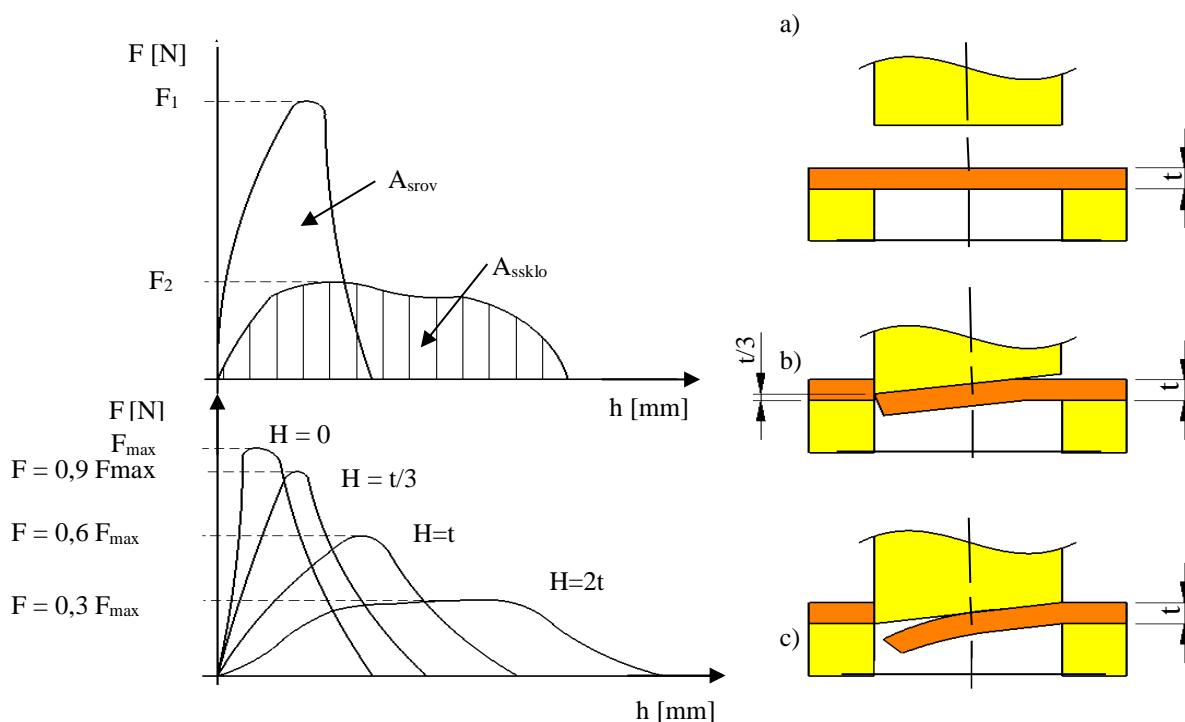
kde: A_s ... střížná práce [J]

λ ... součinitel plnosti grafu [-]

- střížná práce pro skloněné nože

$$A_{ssklop} = F_s \cdot h \text{ [kJ]} \quad (1.6)$$

kde: h ... dráha nástroje [mm]



Obr. 9 efektivní uspořádání výstřížků [13]

Jak je možné odvodit ze vzorců, tak potřebná velikost síly pro stříh s rovnoběžnými noži je značně vyšší, než pro stříh s noži skloněnými. Rozdílem je i potřebná dráha nástroje, která je u skloněných nožů výrazně delší. Lze tedy snížit potřebnou stříhací sílu na úkor času potřebného pro stříh, jak lze vidět v grafu na obr. 9, kde je zobrazen rozdíl mezi stříháním s rovnoběžnými (obr. 9a) a skloněnými noži o hodnotu $H = t / 3$ (obr. 9b) a $H = t$ (obr. 9c).

1.3 Určení nástřihového plánu [13], [19], [20]

Důležitým aspektem při tvorbě technologického postupu je vytvoření co nejefektivnějšího využití materiálu a co největší eliminace možného odpadu z pásu plechu po stříhání. Materiál tvoří hlavní část ceny výrobku a proto není dobré tento aspekt podceňovat. Optimální nástřihový plán by měl dosáhnout minimálně 70% využití materiálu podle vzorce:

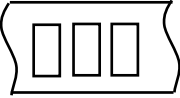
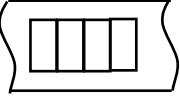
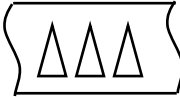
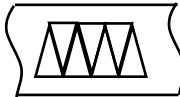
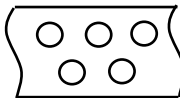
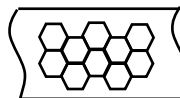


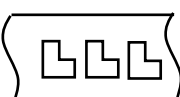
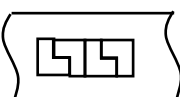
$$\eta = \frac{S_{0celk}}{S_{plech}} [\%] \quad (2.7)$$

kde: η ... využití materiálu [%]

S_{0celk} ... celková plocha
výstřižků [mm^2]

S_{plech} ... plocha pásu plechu [mm^2]

Hospodárného rozmístění výstřižků na plochu polotovaru se dá docílit různými způsoby rozmístění. Ty se mohou různě kombinovat a seskupovat, aby zabraly na pásu plechu co největší plochu (obr. 10).

Typ stříhu	Stříhací náčrtek	
	S přepážkou	Bez Přepážky
Přímý		
Jednořadý		
Víceřadý		
Šikmý		
Vstřícný		

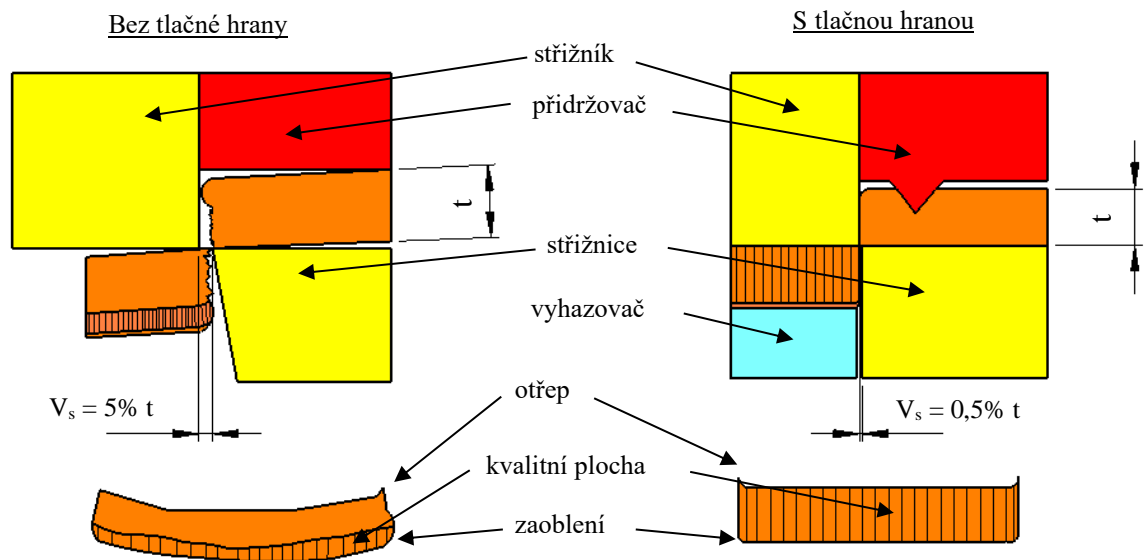
Obr. 10 Varianty rozložení výstřižků [21]

1.4 Přesné stříhání [5], [13], [17], [22]

Pokud se požaduje vyšší přesnost rozměrů a lepší jakost povrchu stříhu, aby zhotovený výstřižek mohl být finálním výrobkem bez potřeby dalších technologických kroků pro dokončení součásti, tak se používá technologie přesného stříhání. Tím se dají docílit přesnosti IT 6 až IT 9 s drsností povrch i $2\mu\text{m}$ na 90% střížné plochy. Principem je rozšíření pásma plastické deformace na celou tloušťku stříhaného materiálu pomocí přidání tlakové napjatosti a vytvořením napjatosti trojosé. Další možností je přistřižení malého množství materiálu z hrany střížné plochy. Tím se přesné stříhání dělí na dvě hlavní skupiny:

- jednooperační přesné stříhání

- reverzní stříhání – u kterého se sevřením materiálu docílí zamezení tvorby tahové složky napjatosti v materiálu.
- stříhání se zápornou vůlí – principem je zamezení projití střížníku skrz střížnici. Střížník zůstává 0,2 až 0,5 mm nad rovinou střížnice a jeho průměr je o 0,1 až 0,2 mm větší, než otvor ve střížnici. Tím se vyvolá v mezikruží materiálu tlakové napětí a následný stříh.
- stříhání s tlačnou hranou – přidržovač kolem střížníku má po obvodu střížné plochy výstupek, který se vlisuje do materiálu jako první a přidá tam tlakovou napjatost, čímž vznikne ve střížné ploše napjatost trojosá. Touto metodou se dají stříhat načisto i silné materiály. Při tloušťce materiálu nad 5 mm lze přidat výstupky i ze strany střížnice. Rozdíl mezi stříháním s přidržovačem bez tlačné hrany a stříhem s tlačnou hranou je vidět na obr. 11.



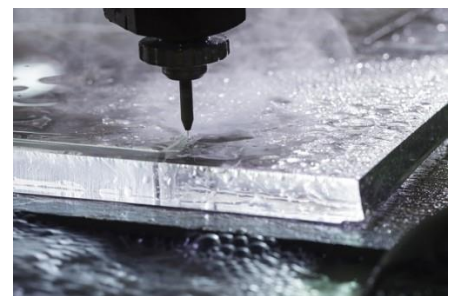
Obr. 11 Stříhání s bez tlačné hrany a s tlačnou hranou [13]

- dvou operační přesné stříhání – přistřižování. Začíná vystřižením dílu zvětšený o přídavek na přistřižení. Poté následuje dodatečné odstřižení přídavku (velikost přídavku se pohybuje od 0,1 do 0,5mm). Kvůli oddělování pouze malého množství materiálu se dosáhne větší přesnosti a kvality povrchu bez mikrotrhlin. Obvykle se používá pouze jedna přistřižovací operace, ale u silných plechů může být těchto operací více.

1.5 Porovnání stříhání oproti jiným technologiím dělení materiálu [23], [24], [25]

Stříhání je velmi efektivní metoda dělení materiálu díky své rychlosti, nízké pořizovací ceně a možnosti stříhat různorodé materiály. Přes to všechno má stříhání svá úskalí (např. nemožnost stříhu pod úhlem a problematika stříhu ostrých úhlů) a je třeba i zvážit výhody a nevýhody jiných technologií dělení materiálu např:

- vodní paprsek – dokáže dělit velké profily i těžko obrobitelné materiály bez tepelného ovlivnění. Součást je poté snadno obrobitelná a při procesu se nenarušuje povrchová úprava materiálu (obr. 12). Nevýhodami oproti stříhání je styk materiálu s vodou smíchanou s abrazivním materiálem, kdy hrozí koroze povrchu materiálu, nelze zhotovit díry malého průměru a dále nutnost vyřezávat menší díly s můstky a jejich následné odstraňování.
- laser – je velmi přesnou metodou pro zpracovávání materiálů malých a středních tloušťek s malou šířkou řezné spáry (do 0,5 mm) a kvalitním povrchem v místě řezu (obr. 13). Oproti stříhání není omezen potřebou nástroje a dokáže si poradit i s ostrými hranami. Hodí se pro malé a střední série. Nevýhodami jsou vysoká pořizovací cena, u tenkých plechů deformace způsobená tepelným ovlivněním materiálu a potřeba přenastavit parametry po změně řezaného materiálu. Navíc kvalita vypálené hrany s nárůstem nečistot na povrchu materiálu značně klesá.



Obr. 12 Řezání vodním paprskem [26]



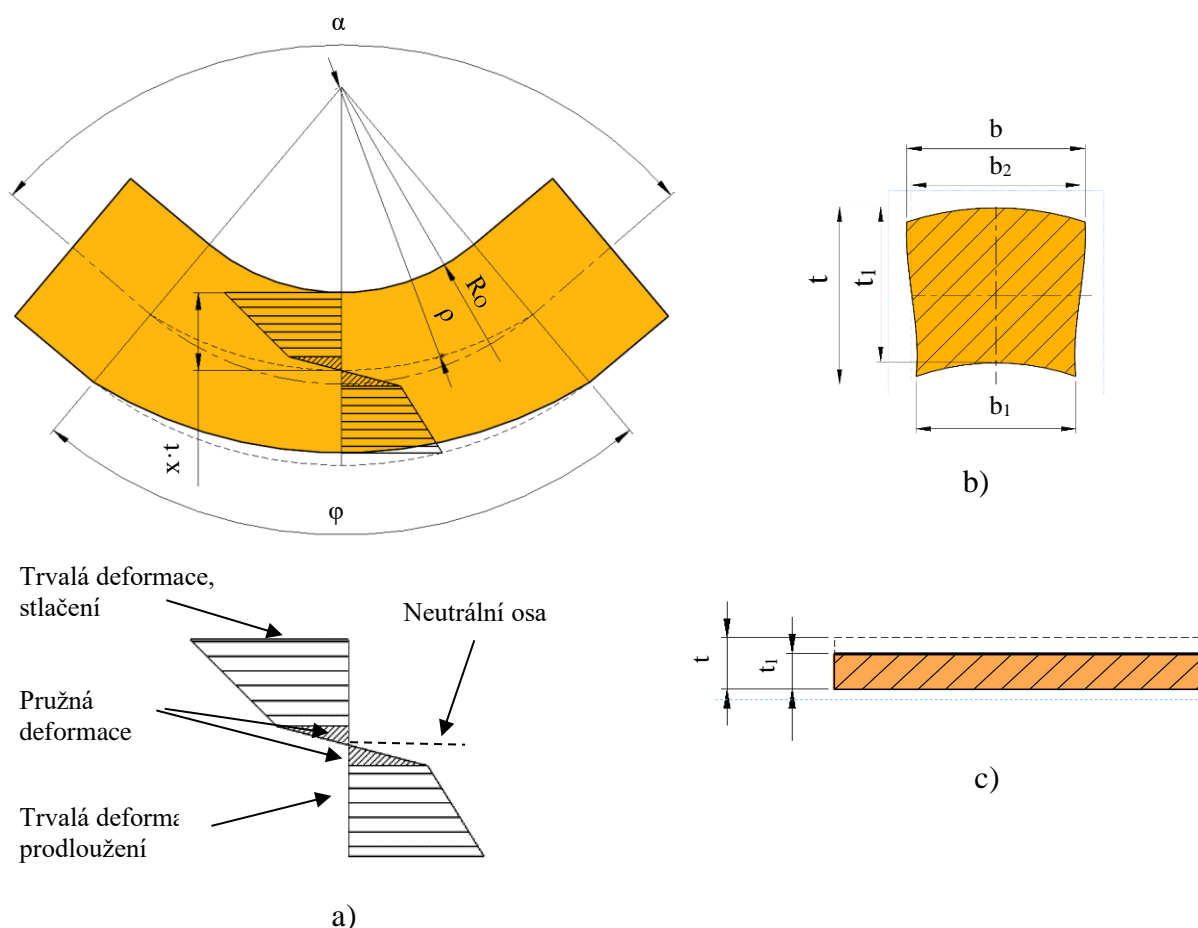
Obr. 13 řezání laserem [27]

2 OHÝBÁNÍ [1], [4], [5], [10], [17], [28]

Technologický proces ohýbání spočívá v působení ohybového momentu na materiál pomocí nástroje - ohýbadla (složeného z ohybníku a ohybnice), u kterého následně po překročení meze kluzu do oblasti plastické deformace dojde k trvalé změně tvaru polotovaru a vznikne výlisek - ohybek. V případě použití větší tloušťky, nebo vyšší pevnosti ohýbaného materiálu se ohyb provádí za tepla, v opačném případě za studena.

Základními druhy ohybů jsou ohyby do tvaru V a U. Dochází zde k pružné plastické deformaci v místě ohybu, která způsobí změnu tvaru plochy ohýbaného polotovaru. Tyto tvary se dají nadále různě kombinovat a vytvořit tak tvarově složitější součásti.

V ohybovém rádiu se nachází dvě složky napětí – tlakové na vnitřní straně rádia a tahové na vnější straně rádia. Zhruba uprostřed tloušťky materiálu (vzdálenost se mění podle použitého materiálu, tloušťky plechu a úhlu ohybu) se nachází neutrální osa, kde se mění tahová složka na tlakovou a nachází se tam nulové napětí (obr. 14a). Jako vedlejší důsledek tohoto jevu může dojít k deformaci materiálu v příčném průřezu. Tento jev je hlavně patrný u ohybu úzkých polotovarů ze silného plechu (obr. 14b), kdy platí vztah $b < 3 \cdot t$, kde b je šířka ohýbaného polotovaru a t je tloušťka plechu. Opačný problém nastává u ohýbání širokých tenkých plechů, kde se materiál v příčném směru nemění, ale dochází k zeslabení tloušťky plechu v místě ohybu (obr. 14c). U těchto ohybů je také problém s možností tvoření vln, které se dají potlačit při přidání tahové síly do procesu ohýbání, nebo přitlačováním materiálu z boku.

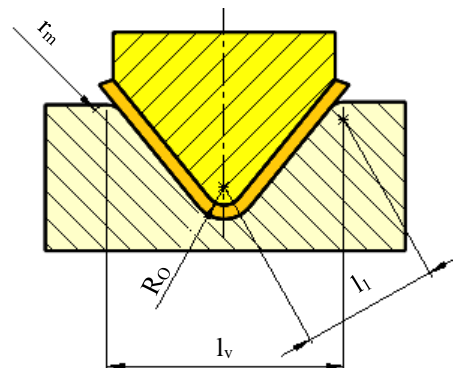


Obr. 14 Průběh ohybu [5]

2.1 Ohybová vůle a poloměr ohybu [10], [19], [29], [30]

Vzdálenost mezi ohybníkem a ohybnicí se nazývá ohybová vůle a je zajištěna sevřením zdvihu lisu. Pokud se jedná o ohyb do tvaru V, tak velikost bývá volena stejná jako je tloušťka materiálu (Obr. 15). V případě ohybu do U je ohybová vůle závislá na tloušťce materiálu, délce ramen ohýbané součásti a součiniteli tření materiálu o ohybnici. Velikost ohybové vůle, poloměr náběhu ohybnice r_m a poloměr ohybu R_0 lze získat pomocí vzorců:

- výpočet ohybové vůle



Obr. 15 Ohybová vůle [19], [30]

$$v_0 = t + c_0 \cdot t$$

(2.1)

kde: v_0 ... ohybová vůle mezi činnými částmi ohýbadla [mm]

c_0 ... součinitel tření o ohybnici [-]

Tab. 2 Koeficientů pro ohybovou vůli a rádius c_0 a r_m [29]

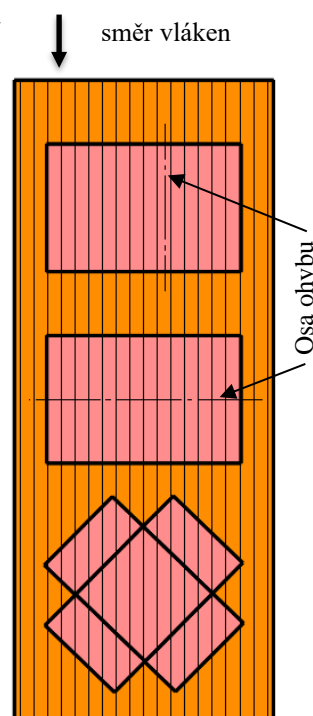
Délka ramene a [mm]	Tloušťka materiálu t [mm]											
	Do 0,5			0,5 až 2			2 až 4			4 až 7		
	l_1	r_m	c_0	l_1	r_m	c_0	l_1	r_m	c_0	l_1	r_m	c_0
35	12	4	0,15	15	5	0,10	20	6	0,08	25	8	0,06
50	15	5	0,20	20	6	0,15	25	8	0,10	30	10	0,08
75	20	6	0,20	25	8	0,15	30	10	0,10	35	12	0,10
100	-	-	-	30	10	0,15	35	12	0,10	40	15	0,10
150	-	-	-	35	12	0,20	40	15	0,15	50	20	0,10
200	-	-	-	45	15	0,20	55	20	0,15	65	25	0,15

- výpočet poloměru ohybu

Minimální rádius, kterým se může ohýbat je závislý na tloušťce, druhu materiálu a v případě válcovaných plechů i na směru válcování. Je zde i závislost na ose ohybu vůči směru válcování plechu. Pokud je osa ohybu kolmo ke směru válcování, tak minimální poloměr ohybu lze odhadnout:

- pro měkké oceli: $R_{\min} = (0,4 \div 0,8) \cdot t$
- pro středně tvrdé oceli: $R_{\min} = 1,5 \cdot t$

Pokud je osa ohybu rovnoběžná s osou ohybu, měl by se minimální poloměr zdvojnásobit kvůli rozdílným vlastnostem materiálu v různých směrech – anizotropii a nebezpečí prasknutí v místě ohybu. Proto by bylo teoreticky ideálním řešením polotovary otočit o 45° vůči směru válcování, jak je zobrazeno na obr. 16. Tím by se potlačil efekt praskání a odpružení, ale v praxi by to bylo značně neekonomické z důvodu nárůstu odpadové složky materiálu. Existují ale i speciální materiály (např. SSAB Laser MC Plus) u kterých nezáleží na směru vláken v materiálu a jejich minimální rádius ohybu je 0 mm až do tloušťky plechu 15 mm.



Obr. 16 Směr vláken [10]

2.2 Neutrální osa a rozměr polotovaru [12], [14], [19]

Určení polohy neutrální osy je důležité pro přípravu rozměrově správného polotovaru pro ohýbání. Umístění neutrální osy většinou nebývá uprostřed tloušťky materiálu a je potřeba toto posunutí dopočítat pomocí vzorce, který se volí dle poměru rádiusu zaoblení R_0 a tloušťky materiálu t .

- pro velké poloměry $R_0 > 12 \cdot t$

$$\rho = R_0 + \frac{t}{2} [mm] \quad (2.2)$$

kde: ρ ... poloměr neutrální osy [mm]

R_0 ... Poloměr ohybu [mm]

- pro malé poloměry $R_0 \leq 12 \cdot t$

$$\rho = R_0 + x \cdot t [mm] \quad (2.3)$$

kde: x ... součinitel polohy neutrální osy [-]

Tab. 3 Součinitel polohy neutrální osy x [19]

Mez pevnosti R_m [MPa]	Poměr R_0/t											
	0,1	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0
Do 400	0,25	0,3	0,32	0,34	0,36	0,37	0,38	0,40	0,41	0,42	0,44	0,45
Nad 400	-	-	-	-	-	-	-	-	0,35	0,36	0,37	0,38
Mez pevnosti R_m [MPa]	Poměr R_0/t											
	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0
Do 400	0,46	0,48	0,48	0,49	0,49	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Nad 400	0,40	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,47	0,48	0,48	0,49	0,49

Velikost součinitele x se liší podle použitého materiálu, nástroje, úhlu a počtu ohýbaných hran. Proto se součinitel v praxi často liší a je zapotřebí experimentálně ověřit. Přibližné hodnoty součinitele x pro široké plechy ohýbané o 90° jsou uvedeny v tabulce 3.

Konečné rozměry polotovaru pro ohýbání se určí součtem délek neutrálních ploch pro jednotlivé úseky a oblouky. Kvůli posunutí neutrální osy v rádiusu ohybu bude polotvar vždy o něco větší, než jen pouhý součet délek jednotlivých úseků. Vzorec pro výpočet délky neutrální osy ohybu vypadá následovně:

$$l_n = \frac{\pi \cdot (180 - \alpha_0)}{180} \cdot (R_0 + x \cdot t) [mm] \quad (2.4)$$

kde: l_n ... délka neutrální plochy [mm]

α_0 ... úhel sevření ramen při ohybu $[\circ]$

2.3 Odpružení [5], [12], [13], [29]

Při ohybu působí v materiálu kromě plastické deformace i zbytková deformace elastická, která po odlehčení ohybníku zmizí, způsobí odpružení a tím vznikne částečné navrácení materiálu do původního rovinného stavu. Velikost odpružení je závislé na ohýbaném materiálu, jeho tloušťce a velikosti úhlu ohybu. Odpružení se dá eliminovat několika způsoby:

- Velikost ohybu zvětšit o úhel odpružení β (obr. 17)

$$\operatorname{tg} \beta = 0,375 \cdot \frac{l_v \cdot R_e}{k_{odp} \cdot t \cdot E} [^\circ] \quad (2.5)$$

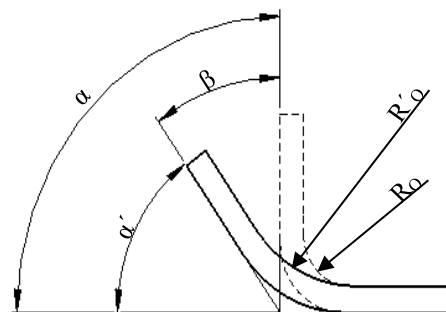
kde: β ... úhel odpružení $[^\circ]$

l_v ... vzdálenost mezi opěrami
ohybnyce [mm]

R_e ... mez kluzu [MPa]

E ... modul pružnosti v tahu [MPa]

k_{odp} ... součinitel úhlu odpružení [-]

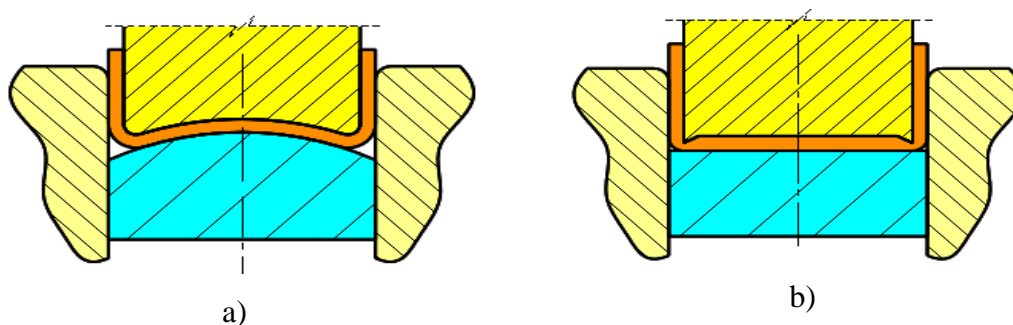


Obr. 17 Úhel odpružení [12]

Tab. 4 Součinitel úhlu odpružení k_{odp} [29]

Poměr R_0/t	Součinitel k_{odp}	Poměr R_0/t	Součinitel k_{odp}
0,10	0,68	5,00	0,52
0,25	0,65	6,00	0,52
0,50	0,62	8,00	0,51
1,00	0,58	10,00	0,51
2,00	0,54	15,00	0,50
3,00	0,53	20,00	0,50
4,00	0,52	-	-

- speciální úpravou nástrojů – vytvoření vypoulení na ohybníku a ohybnici se provádí při širokých ohybech tenkých plechů do tvaru U. Po vyjmutí dílu se lehce zakřivené dno narovná a dojde tím ke změně úhlů mezi stěnami na požadovaný rozměr, viz obr. 18a). Další možností je výroba ohybníku s výstupky, které se vlisují do ohýbaného materiálu v okolí ohybu a tím eliminují odpružení. Tato metoda je vhodná pouze při ohýbání silných plechů a je znázorněna na obrázku 18b).



Obr. 18 speciální úpravy nástrojů [12]

- vlisováním výztužných žeber – touto metodou se do hrany ohybu vlisují výztužná žebra, která nejen eliminují odpružení, ale zároveň tím součást zpevní.

2.4 Výpočet ohybové síly a práce [4], [13], [17],[22], [28]

- výpočet ohybové síly pro V-ohyb:

$$F_{ov} = \frac{R_e \cdot b \cdot t^2}{2 \cdot \rho} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_0}{2} \right) [N] \quad (2.6)$$

$$F_{ocv} = F_{ov} + F_k + F_p \quad (2.7)$$

kde: F_{ov} ... ohybová síla pro V- ohyb [N]

F_{ocv} ... celková ohybová síla pro V- ohyb [N]

b ... šířka ohybu [mm]

F_k ... síla kalibrační $F_k = (2 \div 2,5) \cdot F_o$ [N]

F_p ... síla přidržovací $F_p = (0,25 \div 0,3) \cdot F_o$ [N]

- výpočet práce pro V-ohyb:

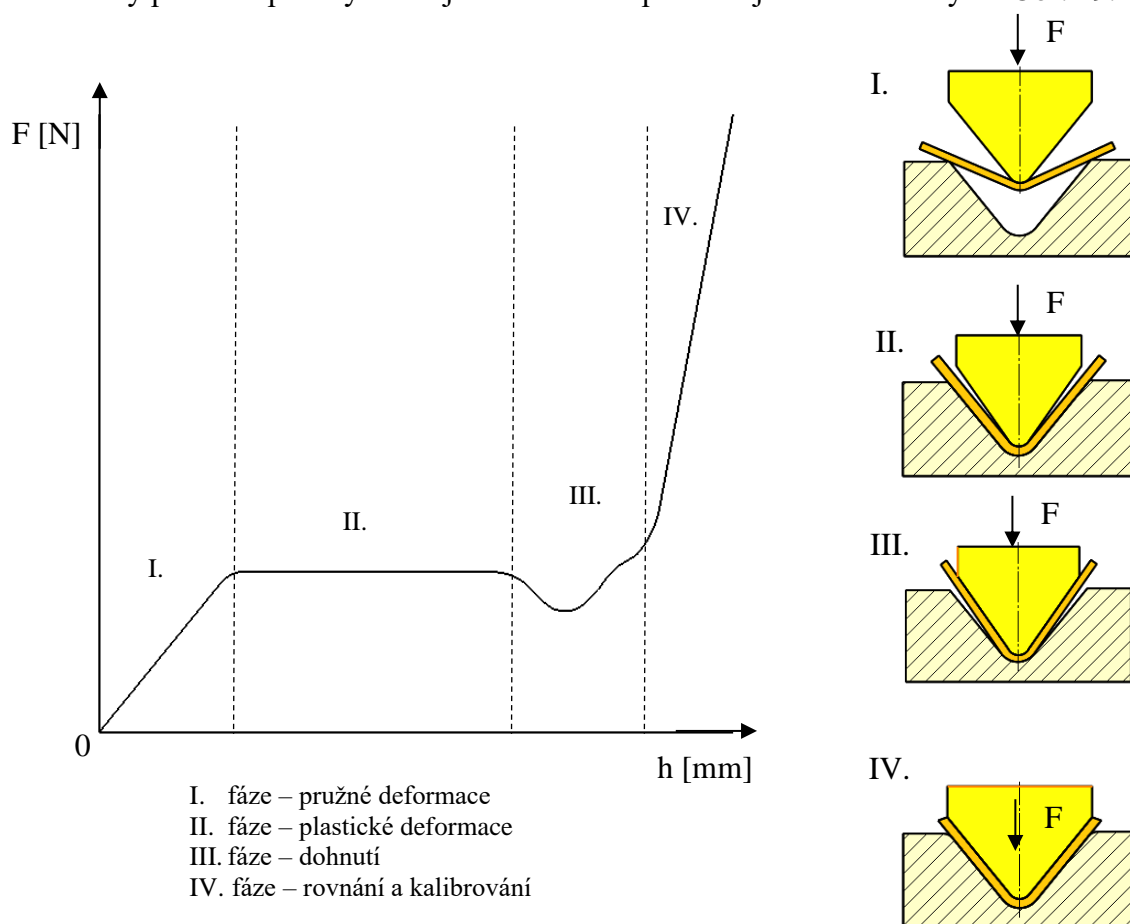
$$A_0 = F_{ocv} \cdot h \cdot m_v [J] \quad (2.8)$$

kde: A_0 ... ohybová práce [J]

h ... dráha nástroje [mm]

m_v ... koeficient zaplnění pracovní plochy diagramu pro V-ohyb = 1,3 [-]

Průběh síly působící při ohýbání a jednotlivé fáze průběhu jsou znázorněny na Obr. 19.



Obr. 19 průběh síly při ohybu [2], [13], [19]

2.5 Porovnání ohýbání oproti jiným technologiím [5], [13]

Tvarově podobné součásti jaké získáváme ohýbáním lze vytvořit i za použití jiných technologií, např:

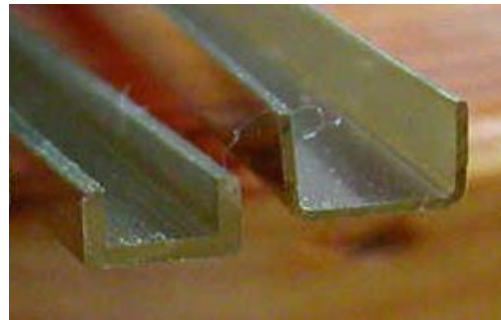
- svařováním – dvou a více dílů. Výhodou je vyšší pevnost, a možná větší komplexnost finálního výrobku, než je možné dosáhnout ohýbáním. Výrobek tím však nabývá na váze, je lokálně teplotně ovlivněn (může dojít k jeho deformaci), je zapotřebí specializované obsluhy, pracoviště (obr. 20) a proces je časově výrazně náročnější oproti výrobě ohýbáním. Navíc případné svařování tenkých plechů pod ostrými úhly by bylo značně obtížné.
- válcováním – lze získat podobné profily jako při V a U ohybech. Problémem je předem daný tvar profilu, který nemusí vždy vyhovovat esteticky, funkčně, nebo rozměrově (obr. 21). Pokud není potřeba ohyb po celé délce základní plochy, muselo by se do technologického postupu přidat i řezání, nebo frézování v místech, kde rameno není vyžadováno a tím by se navýšila časová náročnost na výrobu.
- frézováním – V a U profilů lze dosáhnout vysoké přesnosti a eliminovat vnitřní a vnější rádiusy. Problémem se ale stává daleko vyšší pořizovací cena způsobená dlouhou výrobní dobou a velkou mírou odpadního materiálu. Rozdíl lze vidět na obrázku 22, kde se nachází frézovaný profil vlevo a ohýbaný profil vpravo.



Obr. 20 Sváření [31]



Obr. 21 Válcované profily



Obr.22 Frézovaný a ohýbaný profil [33]

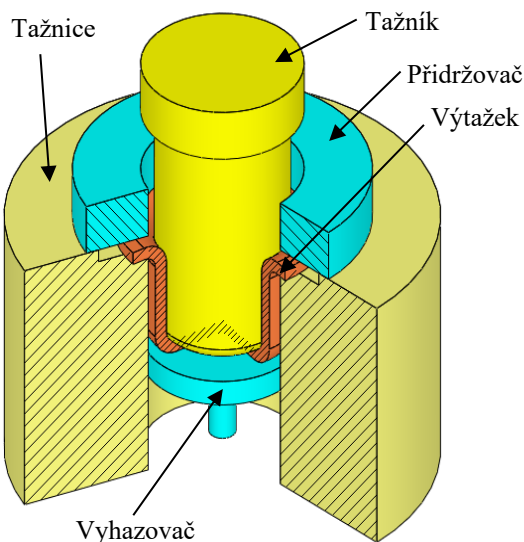
3 HLUBOKÉ TAŽENÍ [2], [3], [5], [6], [13], [34]

Hluboké tažení je ekonomicky přívětivá technologická operace tváření plechů za studena, vhodná do automatizované výroby pro velké výrobní série. Při správném návrhu nástroje a stanovením vhodného technologického postupu je díky vysoké efektivitě a nízké zmetkovitosti návratnost prvotní investice za nástroj velmi rychlá. Výtažky nabývají nejrůznějších tvarů a velikostí od malých jednoduchých kalíšků, nábojnic, džezů, až po velké a tvarově složité karoserie v automobilovém průmyslu.

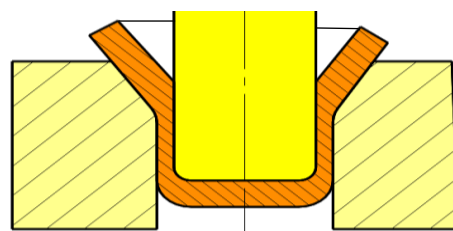
Na materiály určené k hlubokému tažení jsou kladeny nároky speciální nároky z hlediska jejich pevnosti, meze kluzu, tažnosti a chemického složení. Mechanické vlastnosti materiálu by měly být u meze pevnosti ($290 \div 520$) MPa, meze kluzu ($220 \div 280$) MPa a tažnost ($25 \div 36$) %. Chemické složení oceli by mělo obsahovat C ($0,7 \div 0,20$) % a Mn ($0,40 \div 0,80$) %. Příklady takových materiálů jsou např. 11 301, 11 305, 11 321.

Vyhotovení požadované součásti - výtažku, se dosáhne pomocí tlakové síly lisu působící na nástroj – tažník a pomocný přidržovač. Následným vtažením polotovaru - přístřihu do otvoru tažnice, kde nabývá požadovaného miskovitého tvaru. Pokud výtažek nemá propadávat otvorem v tažnici dolů, tak se v otvoru tažnice nachází vyhazovač, který zajišťuje po dokončení tažení výjmutí výtažku z tažnice (Obr. 23). Tažení se dělí dle:

- tloušťky stěny - tažení se ztenčením stěny a bez ztenčení. U některých výtažků je zapotřebí mít větší tloušťku dna, než stěny (např. nábojnice). Při tomto požadavku je mezera mezi tažníkem a tažnicí menší, než je tloušťka materiálu a tím dochází ke ztenčení stěny a zachováním síly dna (Obr. 24). Při tažení bez ztenčení stěny také k určité redukci dochází, ale ta je zanedbatelná.



Obr. 23 Hluboké tažení [13]



Obr. 24 tažení se ztenčením stěny [5]

- tvar výtažku - existují dvě hlavní skupiny: Výtažky rotační a nerotační (do nerotačních spadají i výtažky s nepravidelnými tvary). Hlavním rozdílem je působení nerovnoměrné a daleko větší napjatosti v rozích nerotačních výtažků oproti výtažkům rotačním.
- poperací - jednoduché mělké výtažky se dají vytáhnout na jednu operaci, ale pokud má být výtažek hlubší, nebo složitějšího tvaru, tak je potřeba víceoperační tažení, aby nedošlo k utržení dna a zvýšení zmetkovitosti výroby. Pokud je operací více za sebou, tak je do technologického postupu mezi 3. a 5. operací zařazeno rekrystalizační žíhání, které obnoví původní vlastnosti materiálu a umožní další tažení (ve většině případů následuje rekrystalizační žíhání po 3. operaci).
- použití přidržovače - výtažky z tenkých plechů většinou potřebují přidržovač, který zabráňuje zvlnění stěn výtažku a zlepšuje celkovou kvalitu tažení. Naopak silné plechy nad 3 mm jsou dostatečně tuhé a přidržovač zpravidla není úplně nutný.

3.1 Velikost polotovaru [3], [6], [13], [34]

Správné rozměry a materiál přístřihu definují kvalitu a efektivitu tažení. Při použití příliš malého přístřihu se způsobí větší vtahování materiálu a snižuje se tím možná výška stěny. Následuje zvyšující se riziko výroby neshodného kusu a to zejména u nerotačních výtažků. Pokud je přístřih naopak příliš velký, poté následuje narůst množství odpadu na větší, než je nutné. Ideální velikost polotovaru lze určit pomocí zákona zachování objemu, rovnosti ploch a hmotností vůči výslednému výtažku pomocí výpočtů, diagramů, nebo grafiky. Základem je stálost objemu výtažku a konstantní tloušťky stěn, ale z důvodu výskytu cípatosti na obrubě taženého materiálu a jeho následném odstranění je potřeba přičíst k vypočtenému objemu 3% pokud je tažen na jednu operaci a další 1% za každou operaci navíc. Metod pro určení přístřihu je několik, kromě Guldinova pravidla a grafické metody, které se dnes již nepoužívají to jsou:

- metoda rovnosti ploch – se používá u tvarově jednoduchých dílů a slouží k rychlému zjištění výchozího polotovaru. U tenkých plechů se dá tloušťka stěny zanedbat a počítají se pouze plochy, viz Obr. 25.

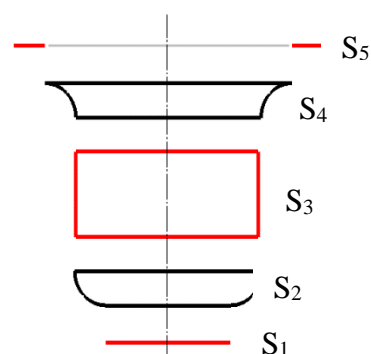
$$S_p = S_v \quad (3.1)$$

$$S_v = \sum_{i=1}^n S_i \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.2)$$

kde: S_p ... plocha přístřihu [mm²]

S_v ... plocha výtažku [mm²]

S_i ... elementární plocha výtažku [mm²]



Obr. 25 Metoda rovnosti ploch [3]

- zjednodušený vzorec – používá se pro výpočet předběžného rozměru přístřihu D_0 .

➤ Válcové výtažky bez příruby:

$$D_0 = \sqrt{d_s^2 + 4 \cdot d_s \cdot h_{vmin}} \text{ [mm]} \quad (3.3)$$

kde: D_0 ... průměr přístřihu [mm]

d_s ... střední průměr výtažku [mm]

h_{vmin} ... minimální výška výtažku [mm]

➤ Válcové výtažky s přírubou:

$$D_0 = \sqrt{d_s^2 + 4 \cdot d_s \cdot h - 3,44 \cdot d_s \cdot r} \text{ [mm]} \quad (3.4)$$

kde: r ... poloměr zaoblení příruby u dna [mm]

- programový software - ve 3D modelovacích programech (Inventor, SolidWorks, SolidEdge, Catia, atd.) lze zjistit přesný objem výtažku a snadno si dopočítat průměr přístřihu.

3.2 Tažný poloměr [34]

Velikost zaoblení hrany tažnice je nazýván tažným zaoblením, nebo tažný poloměr. Přes tento rádius je vtahován materiál do tažnice a tím určuje kvalitu tahu. Je-li poloměr příliš malý, tak tažený materiál má tendenci se trhat a při příliš velkém tažném poloměru se má okraj přístřihu tendenci vlnit. Poloměr se volí mezi 4 až 10násobkem tloušťky plechu. Dolní mez se volí pro výtažky s malou redukcí. Pro výtažky u kterých se neplánuje s odstřížením příruby a proto je vyžadován nezvlněný okraj. Pro výtažky s větší redukcí se volí horní mez, ale musí se počítat s větší cípatostí a následným odstraněním zvlněné části výtažku. Přibližná velikost poloměru se dá pro ocelové a mosazné plechy určit dle empirického vzorce:

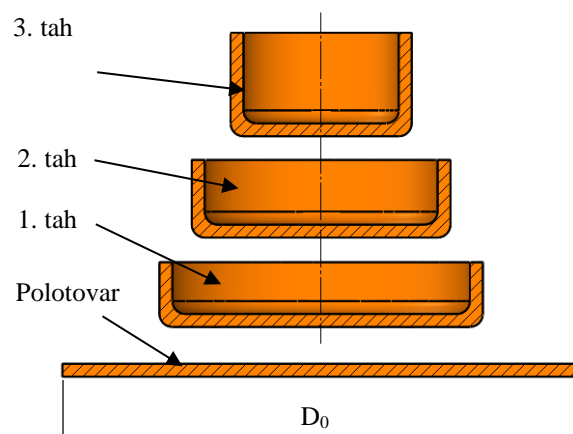
$$r_{taž} = 0,8 \cdot \sqrt{(D_0 - d_{taž}) \cdot t} \text{ [mm]} \quad (3.5)$$

kde: $r_{taž}$... tažný poloměr [mm]

$d_{taž}$... průměr tažníku [mm]

3.3 Počet tažných operací [5], [34]

Vyžadované rozměry výtažku jsou někdy výrobitelné za použití pouze jedné tažné operace, ale většinou je tažných operací zapotřebí více (Obr. 26). Snahou je, aby byl tažen vždy co nejmenší průměr výlisku a aby se dosáhlo co nejmenšího počtu tažení. Hlavními faktory při určování počtu operací jsou: kvalita plechu, materiál, poměrná hloubka, podmínky při tažení, druhem technologie, tloušťkou plechu, silou přidržovače a mazáním. Tyto faktory zastupuje součinitel tažení „m“, který se určí z redukce původního rozměru R [%] (Tab. X). S přibývajícimi tažnými peracemi ovšem klesá tvárnost materiálu. Proto je zpravidla potřeba po třetí, až páté tažné operaci materiál rekrytalizačně vyžítat, aby se obnovily jeho původní vlastnosti. V praxi žíhání většinou následuje po 3. tažení.



Obr. 26 Počet tažných operací [34]

Tab. 5 Redukce tažení R [34]

Tloušťka ocelového plechu [mm]	Redukce původního průměru - R[%]							
	1.tah		2.tah		3.tah		4.tah	
	Běž.	Max.	Běž.	Max.	Běž.	Max.	Běž.	Max.
Do 1,6	40	47	20	25	18	20	16	18
Od 1,6 do 3,2	40	47	15	18	14	15	13	14
Od 4,2 do 4,8	40	47	12	15	11	12	10	11
Od 4,8 do 6,4	40	47	10	12,5	9	10	8	9
Přes 6,4	40	47	8	10	7	8	6	7

- Výpočet tažných operací:

- Součinitel tažení:

$$m = \frac{100 - R}{100} [-] \quad (3.6)$$

kde: m ... součinitel tažení [-]

R ... redukce původního rozměru přístřihu [%]

- Počet tažných operací

$$m_c = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot \dots \cdot m_n [-] \quad (3.7)$$

kde: m_c ... celkový součinitel tažení [-]

m_i ... součinitel tažení pro tah i [-]

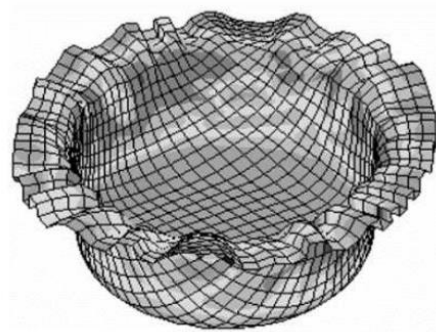
$$m_i = \frac{d_i}{d_{i-1}} [-] \quad (3.8)$$

kde: d_i ... průměr výtažku pro tah i [mm]

d_{i-1} ... průměr předchozího výtažku (průměr rondelu při prvním tahu) [mm]

3.4 Použití přidržovače [5], [13], [17], [35]

Pro zlepšení kvality a přesnosti tažení se zpravidla používá přidržovač, který zabraňuje zvlnění příruby (Obr. 27) a zajišťuje správné a rovnoměrné tečení materiálu do tažnice. Při použití tenkých plechů do tloušťky 0,5mm se přidržovač musí použít vždy. Naopak při použití silných plechů nad 3 mm a při mělkém tažení s redukcí nižší než 10 % přidržovač není třeba a nástroj je levnější a konstrukčně méně složitý. Vše ale záleží na tloušťce materiálu, tažné vůli a zaoblení tažné hrany. Určení potřeby přidržovače lze určit několika způsoby:



Obr. 27 Zvlnění příruby [36]

- podle Freidlinga

$$\alpha_{přid} = \left(\frac{t}{D_0} \right) \cdot 100 \quad [-] \quad (3.9)$$

$\alpha_{přid}$... koeficient potřeby přidržovače pro tažení [-]

- Pokud: $\alpha_{přid} < 1,5$ \Rightarrow je třeba použít přidržovač
 $1,5 < \alpha_{přid} < 2$ \Rightarrow je třeba ověřit, jestli je přidržovač nutný
 $2 < \alpha_{přid}$ \Rightarrow přidržovač není potřeba

- podle ČSN 22 7301

➤ pro první tažení:

$$\alpha_{přid} = 50 \cdot \left(z_{mat} - \frac{\sqrt{t_0}}{\sqrt[3]{D_0}} \right) \quad [-] \quad (3.10)$$

kde: z_{mat} ... materiálová konstanta (hlubokotažná ocel $z=1,9$) [-]

pokud: $\alpha_{přid} < 100 \cdot d/D_0 \Rightarrow$ Mělké tažení, není nutný přidržovač

$\alpha_{přid} \geq 100 \cdot d/D_0 \Rightarrow$ Je nutný přidržovač

➤ pro následující operace:

$$d_i - d_{i-1} < 0,9 \quad (3.11)$$

V případě splnění této podmínky, je možné táhnout bez přidržovače.

- podle Šofmana

$$D_0 - d \leq 18 \cdot t \quad (3.12)$$

Pokud je výše zmíněný vztah splněn, tak není potřeba přidržovač.

3.5 Tažná vůle [12], [22]

Při tažení je třeba dbát na velikost tažné vůle mezi tažníkem a tažnicí, která ovlivňuje celý proces. Při použití příliš malé vůle se materiál začne zadírat, je potřeba daleko větší tažné síly a hrozí tím utržení dna. Naopak, pokud je tažná vůle velká, tak dochází ke zvlnění stěn výtažku. Určení tažné vůle lze pomocí vzorce:

Pro první operaci:

$$z = (1,2 \div 1,3) \cdot t \quad [mm] \quad (3.13)$$

kde: z ... tažná mezera [mm]

Pro následující operace:

$$z = (1,1 \div 1,2) \cdot t \quad [mm] \quad (3.14)$$

3.6 Výpočet tažné síly a práce [3], [4], [5], [13]

Pro přetvoření přístřihu do finálního rozměru je zapotřebí spočítat potřebné síly a práce při tažení, kvůli určení dostatečně silného lisu pro výrobu. Výsledná tažná síla se určí součtem jednotlivých dílčích sil při tažení (síly pro tažení a případně sil pro přidržovač a vyhazovač).

- Výpočet celkové tažné síly (při zanedbání vyhazovače):

$$F_{tcelk} = F_{taž} + F_p \text{ [N]} \quad (3.15)$$

kde: F_{tcelk} ... celková tažná síla [N]

$F_{taž}$... tažná síla [N]

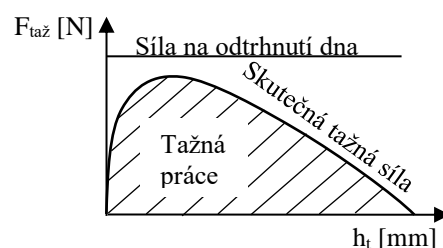
F_p ... síla přidržovače [N]

➤ Výpočet tažné síly

Tažná síla se spočítá z maximální síly, kterou stěny výtažku mohou přenášet. Největší je na počátku, kdy se polotovár přetváří na duté těleso a poté nabírá klesající tendenci, jak lze vidět na Obr. 28. Vzorec pro výpočet tažné síly pro utržení dna:

$$F_{tmax} = \pi \cdot d \cdot t \cdot R_m \text{ [N]} \quad (4.16)$$

kde: F_{tmax} ... maximální tažná síla [N]



Obr. 28 Tažná síla a práce [22]

Skutečná síla pro tažení je ve skutečnosti o něco menší a je závislá na redukci velikosti přístřihu.

$$F_{tskut} = F_{tmax} \left(\frac{D_0}{d} - 0,7 \right) \text{ [N]} \quad (3.17)$$

Kde: F_{tskut} ... skutečná síla při tažení [N]

➤ Výpočet síly přidržovače

Síla vyvinutá přidržovačem musí být dostatečně velká, aby zabránila zvlnění stěn výtažku a zároveň ne taková, aby bránila vtahování materiálu do tažnice. Doporučené hodnoty tlaků vyvinuté přidržovačem závisí především na materiálu a jeho tloušťce. Velikost tlaku přidržovače pro ocelové plechy se určí pomocí tabulek (Tab. 6), nebo pomocí vzorce:

$$F_p = S_{styk} \cdot p_p \text{ [N]} \quad (3.18)$$

kde: F_p ... síla přidržovače

S_{styk} ... styková plocha
přidržovače [mm²]

p_p ... tlak přidržovače [MPa]

Tab. 6 Tlak přidržovače [3]

Tloušťka taženého plechu [mm]	Tlak přidržovače pro ocelový plech [MPa]	
	Tvrký	Hlubokotažný
0,6	2,8	2,0 až 2,4
1	2,7	1,8 až 2,3
2	2,6	1,8 až 2,1
3	2,5	1,9 až 2,1
4	2,3	1,9
5	2,2	1,8

- Výpočet tažné práce

Práce bude tedy plocha pod křivkou skutečné tažné síly a dráhy tažníku, jak je to znázorněno na Obr. 29.

$$A_{taž} = \frac{F_{tcelk} \cdot h_t \cdot c}{1000} \text{ [J]} \quad (4.19)$$

kde: $A_{taž}$... tažná práce [J]

h_t ... hloubka tažení [mm]

c ... koeficient (tažení bez kalibrace $c=0,66$, tažení s kalibrací $c=0,8$) [-]

3.7 Maziva pro tažení [3], [15], [22]

Při tažení vznikají velké tlaky mezi taženým materiálem a nástrojem. Proto je třeba zvolit vhodné mazivo, které dané tření snižuje. Správné mazivo by mělo snížit tření natolik, aby síly při tažení nezpůsobily porušení materiálu. Zároveň snížit opotřebení tažidla a zabránit zadírání a poškození povrchu výtažku. Ze strany tažníku je žádané co největší tření a naopak co nejmenší tření ze strany tažnice.

Mazivo by mělo pokrýt povrch výtažku souvislým homogenním filmem, které se nesmí porušit při vysokém tlaku tažení. Při lehkém tažení, kdy tlak dosahuje do 600 MPa se používají čistá kapalná maziva. Pokud je tlak vyšší, tak se do maziva přidává jemně rozptýlená tuhá složka – plnidlo, které zapříčiní dokonalé spojení s povrchem materiálu a je odolné proti teplu vzniklém z důvodu tření.

Pro lehčí tažení oceli se používá řepkový olej, těžší tahy vyžadují směsi řepkového, nebo živočišného oleje a plavené křídly, kdy je třeba přípravu provést minimálně 24 hodin před tažením. Druhým mazivem pro těžké tahy je řepkový olej smíšený s bělobou olovnatou a třetím mazivem je zahřátá směs řepkového oleje, grafitu a hovězího oleje v poměru 2:1:1.

U korozivzdorných ocelí je potřeba zabránit přímému styku tažnice a přístřihu, proto je u maziva kladen důraz na vysokou soudržnost, aby nedošlo k porušení mazacího filmu při vysokém tlaku. Proto nelze využít mýdlových roztoků a lehkých olejů. Ideální směsí je řepkový olej a běloby olovnaté s příměsí 5÷10% sirného květu, který bezpečně oddělí tažený nerezový plech od kovu nástroje.

Snadné odstranění maziva z výtažku je zásadním aspektem při jeho výběru. Odstraňování většinou může být náročným a nákladným procesem, jelikož čím lepší mazivo se použije, tím těžší je jeho odstranění z výtažku. Takovým příkladem může být kvalitní tuhé mazivo – grafit.

3.8 Porovnání hlubokého tažení s dalšími technologiemi [5], [13]

Hlubokým tažením se vyrábí nejrůznorodější výrobky od malých nábojnic, hrnců až po velké vany a automobilové karoserie. Výrobky podobných tvarů lze vyrobit i za pomoci jiných technologií, např.:

- odléváním – je také možné zhotovit výrobky podobných tvarů, ale oproti hlubokému tažení je zapotřebí specializovaného pracoviště (obr. 29) a není možné vyrábět menší tenkostěnné výrobky se stejnou rychlostí, přesností, rozměry a cenovými náklady na výrobu.
- svařováním – lze také vyrobit velké miskovité nádoby (obr. 30), ale při velkých sériích by čas na jejich výrobu byl mnohonásobně delší a váhy by byla vyšší, než by tomu bylo při hlubokém tažení. Problematická příprava polotovárů tvarově složitých ploch a rozdílná jakost jednotlivých výrobků by také nebyla zanedbatelná a tím by se navýšila i potřeba kontroly jakosti.



Obr. 29 Odlévání [37]



Obr. 5 Sváření [38]

4 ZÁVĚRY

Tato literární studie porovnává rozdíl v technologiích stříhání, ohýbání a hlubokého tažení při použití ocelových plechů větších tloušťek (nad 3 mm) vůči tenčím plechům. Porovnání s technologiemi pro výrobu součástí podobných tvarů a návrh materiálů.

Pro technologie plošného tváření bylo prokázáno, že s rostoucí tloušťkou materiálu úměrně stoupá potřebná síla pro deformaci materiálu. Řešením tohoto problému je použití výkonnějších strojů, předehřátí materiálu, nebo upravený nástroj.

U stříhání silných plechů se problém potřeby příliš výkonného stroje řeší nahřátím stříhaného materiálu, nebo skloněným ostrím, které redukuje aktuální střížnou plochu a snižuje tím nároky na výkon stroje za cenu zhoršení střížné plochy, nebo jejich kombinací. Efekt zhoršené kvality střížné plochy stříhu je možné eliminovat použitím přidržovače, kde u silných plechů se může nacházet i přitlačná hrana, nebo následným ostřížením malé okrajové části materiálu a tím zlepšit kvalitu výstřižku.

U technologie ohýbání mají silné plechy tu výhodu, že je zde možné eliminovat odpružení vlisováním výstupků do dna ohybku a tím eliminovat odpružení. Dalším rozdílem je zvětšující se poloměr hran ohybnice s rostoucí tloušťkou plechu. Zbylé parametry jakými jsou výpočty poloměru ohybu a posun neutrální osy jsou vesměs stejné jako při výpočtech pro plechy tenké. Vyjimku tvoří použití speciálních materiálů pro ohyb, jakým je např. SSAB Laser MC Plus, kdy minimální poloměr ohybu je 0 mm pro slabé i silné plechy až do tloušťky materiálu 15 mm.

Pro technologii hlubokého tažení je na rozdíl od stříhání a ohýbání nutnost použití materiálů přímo určených pro tažení (např. 11 301, 11 305, 11 321). Při použití jiných materiálů hrozí porušení materiálu a utržení dna v průběhu procesu. Technologie hlubokého tažení silných plechů má několik výhod oproti plechům tenkým. Prvním z nich je výroba výtažků se ztenčením stěny, kdy je možnost získat výtažek s větší tloušťkou materiálu na dně výtažku. Toho se dá využít při výrobě např. nábojnic, nebo hrnců. Další výhodou silných plechů je možnost nepoužít přidržovač při tažení s redukcí menší, než 10 %. Tím se nástroj stává levnějším a méně složitým. Nevýhodou oproti tenkým plechům zůstává, že je zapotřebí daleko výkonnějších strojů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. TSCHÄTSCH, Heinz. *Metal forming practise: processes, machines, tools*. 1.vyd. Berlin: Springer, c2006. ISBN 35-403-3216-2.
2. BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet metal forming processes and die design*. New York: Industrial Press, 2004. ISBN 08-311-3182-9.
3. TIŠNOVSKÝ, Miroslav a Luděk MÁDLE. *Hluboké tažení plechu na lisech*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1990. Knižnice technických aktualit. ISBN 80-030-0221-4.
4. LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření*. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-72-1-579-6
5. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Milan HORÁČEK. *Technologie II*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. ISBN 80-214-2032-4.
6. *Obi* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.obi.sk>
7. *IWON Metal Products Co, Ltd* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <http://cz.precisaofabricacao.com>
8. *Zechin Industries Group Co., Ltd* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.metalpartfabrications.com/>
9. *Tianjin Tianyingtai Steel Group* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <http://id.tyt-steelpipe.com>
10. *Technologie tváření - skripta* [online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/technologie_tvareni/index.htm
11. FINDRA, Luděk a Roman HALTUF. *Akademie tváření: Stříhání. MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-strihani.html>
12. NOVOTNÝ, Karel a Zdeněk MACHÁČEK. *Speciální technologie I. Plošné a objemové tváření*. Vyd. 2. Brno: VUT, 1992, 171 s. : il. ; 30 cm. ISBN 80-214-0404-3.
13. LENFELD, Petr. *Katedra strojírenské technologie - Skripta: Technologie II* [online]. Liberec, [2008]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/06.htm
14. *Střížný nástroj. Strojírnoství - Engineering* [online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <http://www.strojirnostvi.wz.cz/image.php?subject=1&class=6&topic=51&image=0>
15. ROMANOVSKIJ, Viktor Petrovič. *Příručka pro lisování za studena*. Přeložil Josef VLADYKA. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959. DT 621.986.16.
17. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
18. ČSN 22 6015. *Stříhadla a střížné vřtle: Směrnice pro výpočet a konstrukci*. Praha: Vydavatelství ÚNM, 1977. 28 s. N 16 198.
19. BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3242-0.
20. KOTOUČ, Jiří. *Nástroje pro tváření za studena* [online]. České vysoké učení technické v Praze, 1978, 158 s. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: http://www.strojar.com/upload/skripta/NVPO_nastroje_pro_tvareni.pdf

21. ČADA, Radek. *Technologie I: Studijní opora*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERSITA OSTRAVA, 2007, 360 s. ISBN 978-80-248-1507-7.
22. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. ISBN 978-80-214-4747-9.
23. *FANUC Czech s.r.o.* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz>
24. *Bystronic Czech Republic s.r.o.* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.bystronic.cz>
25. *Flow* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz>
26. *Swift Glass* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.swiftglass.com>
27. *Onyx Technology* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com>
28. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.
29. ČSN 22 7340. *Ohýbadla: Směrnice pro výpočet a konstrukci*. Praha: Vydavatelství ÚNM, 1975. 13 s.
30. ALTAN, Taylan a tekkaya ERMAN. *Sheet metal forming: fundamentals* [online]. Materials Park: A S M International, 2012 [cit. 2021-05-21]. ISBN 978-161-5038-428. Dostupné z: <https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpSMFF0001/viewerType:toc>
31. *WaterWelders* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://waterwelders.com/types-of-welding-jobs-careers>
32. *HUTNÍ MATERIÁL* Břeclav, s.r.o. [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <http://www.hutnimaterial.com>
33. *Litomysky* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <http://www.litomysky.cz>
34. BAREŠ, Karel et al. *Lisování: Určeno [také] stud. na stř. a vys. odb. školách*. Praha: SNTL, 1971, 542 s.
35. MACHEK, Václav, Ladislav VESELÝ, Milan VESELÝ a Jaroslav VIŠŇÁK. *Zpracování tenkých plechů*. Praha: SNTL, 1983, 266 s.
36. WIFI, Abdala a Ayman MOSALLAM. Some aspects of blank-holder force schemes in deep drawing process. *AMME Journal*. 2007, 2007(24), 8. ISSN 1734-8412.
37. *H V H spol. s r.o.* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://hvh.cz>
38. *B a K Písek* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <http://bak-systemy.cz>
39. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A_0	ohybová práce	[J]
A_s	střížná práce	[J]
$A_{taž}$	tažná práce	[J]
B	šířka ohybu	[mm]
c	koeficient tažení	[-]
c_0	součinitel tření o ohybnici	[-]
D_0	průměr přístřihu	[mm]
d_i	průměr výtažku pro tah i	[mm]
d_{i-1}	průměr předchozího výtažku	[mm]
d_s	střední průměr výtažku	[mm]
$d_{taž}$	průměr tažníku	[mm]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
F_k	síla kalibrační	[N]
F_{ocV}	celková ohybová síla pro V-ohyb	[N]
F_{oV}	ohybová síla pro V- ohyb	[N]
F_P	síla přidržovací	[N]
F_s	střížná síla	[N]
F_{tcelk}	tažná síla	[N]
F_{tcelk}	celková tažná síla	[N]
F_{tmax}	maximální tažná síla	[N]
F_{tskut}	skutečná síla při tažení	[N]
h	dráha nástroje	[mm]
h_t	hloubka tažení	[mm]
h_{vmin}	minimální výška výtažku	[mm]
k_{odp}	součinitel úhlu odpružení	[-]
l_n	délka neutrální plochy	[mm]
l_v	vzdálenost mezi opěrami ohybnice	[mm]
m	součinitel tažení	[-]
m_c	celkový součinitel tažení	[-]
m_i	součinitel tažení pro tah	[-]
m_v	koeficient zaplnění pracovní plochy diagramu pro V-ohyb	[-]
n_s	součinitel otupení nástroje pro stříh	[-]
o_s	obvod střížné plochy	[mm]
p_p	tlak přidržovače	[MPa]
r	poloměr zaoblení příruby u dna	[mm]
R	redukce původního rozměru přístřihu	[%]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
R_o	poloměr ohybu	[mm]
S_i	elementární plocha výtažku	[mm ²]
S_{0celk}	celková plocha výstřižků	[mm ²]
S_p	plocha přístřihu	[mm ²]
S_{plech}	plocha pásu plechu	[mm ²]
$S_{stříz}$	plocha stříhu	[mm ²]
S_{styk}	styková plocha přidržovače	[mm ²]
S_v	plocha výtažku	[mm ²]
t	tloušťka materiálu	[mm]

Označení	Legenda	Jednotky
v_0	ohybová vůle mezi činnými částmi ohýbadla	[mm]
v_s	koeficient otupení nástroje	[-]
x	součinitel polohy neutrální osy	[-]
z	tažná mezera	[mm]
z_{mat}	materiálová konstanta	[-]
$\alpha_{nož}$	úhel sklonu nožů	[°]
α_O	úhel sevření ramen při ohybu	[°]
$\alpha_{přid}$	koeficient určení potřeby přidržovače pro tažení	[-]
β	úhel odpružení	[°]
η	využití materiálu	[%]
λ	součinitel plnosti	[-]
ρ	poloměr neutrální osy	[mm]
τ_s	mez pevnosti ve smyku	[MPa]
$r_{taž}$	tažný poloměr	[mm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2 Příklady výrobků plošného tváření [6], [7], [8], [9]	9
Obr. 2 Střížný nástroj pro víceoperační stříhání [14]	10
Obr. 3 Rovnoběžné nože [2]	10
Obr. 4 Okamžitá střížná plocha [13]	10
Obr. 5 kotoučové nože [5]	11
Obr. 6 plocha stříhu [13]	11
Obr. 7 Střížná mezera [12]	12
Obr. 8 Detaily střížné plochy [13]	12
Obr. 9 efektivní uspořádání výstřižků [13]	13
Obr. 10 Varianty rozložení výstřižků [21]	14
Obr. 11 Stříhání s bez tlačné hrany a s tlačnou hranou [13]	15
Obr. 12 Řezání vodním paprskem [26]	15
Obr. 13 řezání laserem [27]	15
Obr. 14 Průběh ohybu [5]	16
Obr. 15 Ohybová vůle [19], [30]	17
Obr. 16 Směr vláken [10]	17
Obr. 17 Úhel odpružení [12]	19
Obr. 18 speciální úpravy nástrojů [12]	19
Obr. 19 průběh síly při ohybu [2], [13], [19]	20
Obr. 20 Sváření [31]	21
Obr. 21 Válcované profily [32]	21
Obr.22 Frézovaný a ohýbaný profil [33]	21
Obr. 23 Hluboké tažení [13]	22
Obr. 24 tažení se ztenčením stěny [5]	22
Obr. 25 Metoda rovnosti ploch [3]	23
Obr. 26 Počet tažných operací [34]	24
Obr. 27 Zvlnění příruby [36]	25
Obr. 28 Tažná síla a práce [22]	26
Obr. 29 Odlévání [37]	27
Obr. 5 Sváření [38]	27

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Přehled vůlí v_s v závislosti na tloušťce materiálu [15]	12
Tab. 2 Koeficientů pro ohybovou vůli a rádius c_0 a r_m [29]	17
Tab. 3 Součinitel polohy neutrální osy x [19]	18
Tab. 4 Součinitel úhlu odpružení k_{odp} [29]	19
Tab. 5 Redukce tažení R [34]	24
Tab. 6 Tlak přidržovače [3]	26